

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

衛星を活用した積雪域の広域積雪深分布把握を目指した
積雪中マイクロ波反射特性の解明

研究代表者 永井裕人¹⁾²⁾
研究分担者 山口悟²⁾、山下克也²⁾、河島克久³⁾

- 1) 早稲田大学教育・総合科学学術院 教育学部 理学科地球科学専修
- 2) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター
- 3) 新潟大学 災害・復興科学研究所

研究要旨

広域の積雪深分布把握は雪氷防災の基礎的な情報となるが、地上観測点の設置数には限りがある。そこで地球観測衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR) を用いて、広域かつ詳細な積雪深分布を把握する技術を開発する。本研究では、電波反射鏡を実際の雪に埋没させ、合成開口レーダーの反射強度が積雪深にどのように対応するかを解析することで、従来より高解像度かつ高精度な積雪深マップの作成に資する知見を得ることを目指す。解析の結果、Cバンド SAR では無雪状態から積雪深 20 cm までで反射強度が大きく低下し、その後 100 cm 程度まで緩やかに低下することが分かった。また植生のある場所での地面の積雪深推定は難しいが、樹冠に積もった雪の量を定量評価できる可能性が示され、山林における水資源管理への応用を検討する糸口が得られた。さらにLバンド SAR ではCバンドより浅雪に対する感度が小さいことが示唆された。今後の研究の留意点として、反射鏡は周囲の雪を選択的に融かす効果があるため、浅雪時には気象観測に加えて野外カメラを用いた積雪深計測も重要であることが示された。

A. 研究目的

広域の積雪深分布把握技術は、積雪地域のレジリエンス向上のために不可欠な技術である。しかし地上観測点について、特に中山間地域では観測点の間隔が比較的大きいなど、積雪深推定の空間解像度ならびに精度を向上させる上での課題が残る。

合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) を用いた衛星観測では、積雪の深度に応じたレーダー反射強度の減衰が確認されているが、特に日本の豪雪地帯のような 1 m 以上の深雪について、マイクロ波が積雪層のどの深度まで到達しているのかを正確に示すことは難しい。そこで本研究では少数の気象観測地点において、電波反射鏡 (CR: Corner Reflector) を雪に埋没させ、マイクロ波の透過・反射メカニズムの分析から高精度な積雪深マップ作成に資する知見を得ること

を目的とする。

B. 研究方法

CR はマイクロ波を強く反射するため、SAR 観測データの校正検証や高精度な地表面変位測定に利用される。防災科学技術研究所が管理する積雪深観測地点に CR を 6 基設置し、これを積雪に埋没させ、積雪の有無と深さに反射強度 (後方散乱係数 (dB)) がどのように対応するかを解析する。本研究では 12 日毎観測の C バンド SAR 衛星「Sentinel-1/C-SAR」(解像度: 10 m) および、より高分解能の L バンド SAR 衛星「ALOS-2/PALSAR-2」(解像度: 3 m) を利用する。

Sentinel-1 について、2019 年 9 月 6 日から 2020 年 2 月 21 日まで 12 日おきに現地時 17:42 に西側からの観測が実施され、2019 年 9 月 13 日から 2020 年 2 月 28 日まで 12 日おきに現地時 7:43 に東側からの観測が実施された。ALOS-2 については

2019年11月17日と2020年2月23日の現地時23:40に西側からの観測が実施され、2020年2月25日の現地時11:50に東側からの観測が実施された。

衛星観測時の積雪深は防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの地上観測記録値を参照した。10分おきに記録されており、雪氷防災研究センターの露場(37.4260°N, 138.8867°E)(以降、「長岡」とする)と気象観測地点「栃尾田代」(37.3680°N, 138.9475°E)の2点を利用する。

CRは1辺1mの正方形を3枚直角に接合したステンレス製2基と鋼鉄製4基を作成し、ステンレス製は長岡に、鋼鉄製は栃尾田代に設置した。長岡では西向き東向きにそれぞれ1基ずつを設置した。栃尾田代では特に深い雪が想定されることから、反射強度を強めるために、西向きCRを並べて2基設置した。東向きCR1基は見通しの良い場所に置き、もう1基は樹木によって見通しが遮られる場所に設置した。すべての設置作業は2019年11月14日に実施した。これらは地面に強固に固定されており、同じ位置で積雪に埋まっていく。積雪時に無雪状態を基準とした校正を行えるよう、アルミ板を用いて同サイズの可搬型CRも作成し、長岡において計3回の衛星観測時に展開・設置した。

C. 研究結果

まずCバンドSAR、Sentinel-1の観測結果について述べる。CRが設置された無雪時には、それまでの裸地状態(最低-10dB程度)よりも、顕著に強い反射が示され(最大10dB程度)、可搬型CRも展開時に同様の強い反射を示した(11月17日)

(Fig. 1a)。長岡に東西異なる向きに設置したCRについて、東向きCR(無雪時平均: 約9dB)の反射は西向きCR(約7dB)より強い。東向きCRでは積雪深8cm(2月4日)で4.2dBまで低下した。さらに22cmの積雪があった2月9日には西向きCRの反射が著しく低下し、設置前と同程度(-6.5dB)となった。

栃尾田代では11月下旬以降、断続的に50cm以上の積雪が生じた(Fig. 1b)。西向きCRは1画素中に2基設置され、レーダー有効断面積(RCS: Radar Cross Section)が2倍であるにもかかわらず、1基の東向きCRよりわずかに大きい反射に留まった。CRはもともと非常に強い反射を呈する

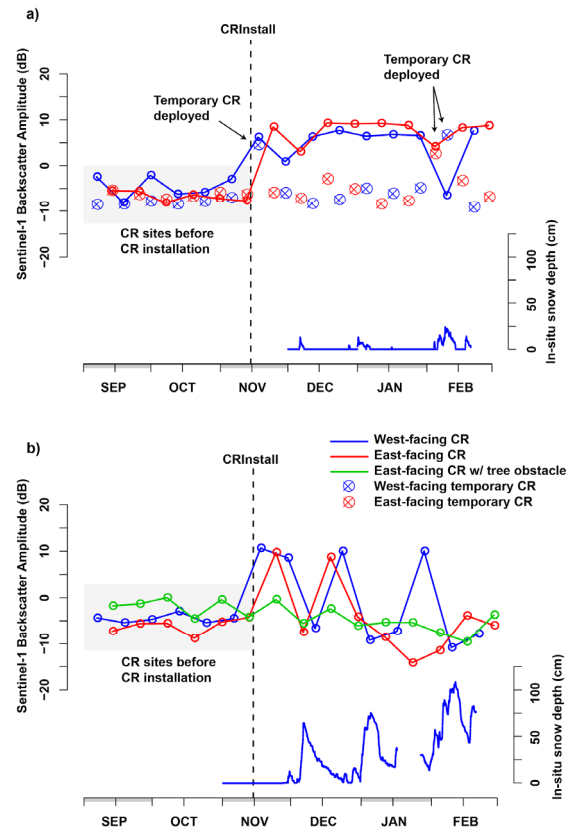


Fig. 1) CR設置場所におけるSentinel-1後方散乱係数と現地計測積雪深の時系列変化。(a)長岡および(b)栃尾田代に設置したCRの反射による。

ため、センサの特性上、測定値が飽和している可能性が高い。これら東西いずれのCRの反射強度も、積雪深の増減に対して負相関の増減を繰り返した。一方、樹木障害を設定した東向きCRは設置前後でほとんど反射強度が変化せず、積雪開始後には地上計測の積雪深に関わらず、緩やかな減少傾向を呈した。

LバンドSAR、ALOS-2の観測結果については、今シーズンの積雪が例年に比べて特に少なかったことが原因で、限定的な結果しか得られなかった(Table 1)。

Table 1) ALOS-2後方散乱係数と現地計測積雪深の計測結果

| 観測日 | 現地時 | 長岡 | | | | 栃尾田代 | | |
|------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 西向き (dB) | 東向き (dB) | 可搬型 (dB) | 積雪深 (cm) | 西向き (dB) | 東向き (dB) | 積雪深 (cm) |
| 2019/6/2 | 23:40 | -9.6 | | -4.1 | 0 | -12.7 | | 0 |
| 2019/11/17 | 23:40 | 10.6 | | 10.0 | 0 | 7.4 | | 0 |
| 2020/2/23 | 23:40 | 11.4 | | 6.8 | 0 | 6.7 | | 54.1 |
| 2019/11/5 | 11:50 | | -11.5 | | 0 | | -11.7 | 0 |
| 2020/2/25 | 11:50 | | 9.8 | | 0 | | 11.8 | 57 |

長岡への西向き CR 設置前後で -9.6 dB から 10.6 dB への顕著な反射増加が見られたのは Sentinel-1 の場合と同様である。それ以降、長岡での積雪はなく、その影響を評価することはできなかった。

栃尾田代では西向き 2 基 CR で積雪深 54 cm に対して 6.7 dB、東向き CR で積雪深 57 cm に対して 11.8 dB の後方散乱係数が得られた。このように積雪時の反射減衰は C バンド SAR と比較して、全くないかごく僅かである。東向きの樹木障害ありの CR については周囲の弱い反射に埋もれたため、設置された位置を明点として特定することはできなかった（山間地では幾何精度が低いため、GPS で記録した座標からも誤差が生じる）。

D. 考察

Figure 1 で時系列表示された Sentinel-1 衛星観測時の積雪深記録と後方散乱係数との対応関係を以下では散布図にまとめた (Fig. 2)。無雪時の反射強度が最も強く、そのうち樹木障害があるものが最も弱い。これらの反射強度は積雪深 10 cm 程度までは正の後方散乱係数値 (dB) である傾向がわかる。積雪深がさらに増加すると、10-20 cm で急激に値が低くなり CR 設置前と同程度となる傾向がある。さらに深くなると、サンプル数が少ないため有意な相関係数は導出できないものの、積雪深 20 cm 以上で後方散乱係数が緩やかに減少する傾向が得られた。これらより、C バンド SAR は 20 cm までの積雪に対して特に感度が強く、積雪の有無も含めて高感度に検知できると言える。そして 20 cm から 100 cm までは概ね積雪深とは負相関であると考えて良い。

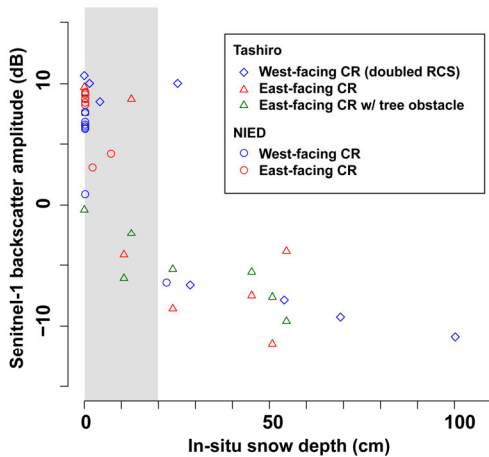


Fig. 2) 現地計測積雪深に対する Sentinel-1 後方散乱係数の散点図

このような積雪深増加に伴う反射強度減少傾向が積雪深 20 cm 付近で屈曲することについて、模式的に説明することができる。まず CR 底面が雪を被り、金属表面での表面反射が妨げられることによって、急激な反射低下 (f_1) が生じる。その後より多くの雪が CR 底面に載ることによって、積雪層内の体積散乱によって衛星以外の方向へ散乱する割合が増加する。これは積雪深に比例する関数で表される (f_2)。同時に側板 2 枚も積雪深増加に比例して徐々に雪に覆われていく (f_3)。これらより後方散乱係数の減少量 ($d\sigma$) は以下の関数で表すことができる。

$$d\sigma = f_1(s) + f_2(s, h) + 2f_3(l, h)$$

s : CR の底面積

h : 積雪深

l : CR の一片の長さ

Figure 2 では積雪深増加に伴う反射強度の減少傾向にばらつきがみられた。この原因として、CR が周辺の雪を融かす効果が考えられる。CR は鉄・ステンレス製であり熱伝導性が高く、さらに滑らかな平板の構造によって太陽の短波放射を周囲に効率的に反射する。雪が浅いときほど、CR の底板上とその周辺だけ小さな積雪深となり、実際には気象観測記録より小さな積雪深であった可能性があることも検討する必要がある。

CR が完全に雪に埋もれた状態での積雪深 (>1 m) に応じた CR 反射特性については、今シーズンの積雪が少なく、観測することができなかった。しかし、Fig. 2 の栃尾田代における最大積雪深 100.2 cm (2 月 9 日) に対する後方散乱係数は -10.9 dB となっており、CR 設置前の反射より小さいことから、体積散乱によって CR の鏡面反射が成立しなくなった状態が想定される。したがって、C バンド SAR の 1 m 以上の積雪深に対する感度は非常に小さいか、全くないと予想できる。

一方で、樹木障害を設定した CR では設置前後での反射強度はほとんど変化せず、積雪深に応じた反射強度低下は他の CR と同様に負の相関関係を示す (Fig. 1b; Fig. 2 の緑点)。これについては CR に電波が到達しているかをさらに精査する必要があるが、Fig. 1b において他の CR と独立した減少トレンドを示していることから、CR 上の積雪深ではなく、手前にある樹木の樹冠に積もった雪の量が反映されている可能性が考えられる。こ

れまでは地面への積雪を対象に研究を進めてきたが、仮に樹冠の反射強度減少が積雪深に負相関対応している場合、植生上の積雪量を推定できるかもしれない。これは広範囲を樹木で覆われた山間地域の水資源管理につながることを示唆するものであり、さらなる研究の展開が期待される。

PALSAR-2 観測について、栃尾田代の西向き CR では積雪 54cm で 6.7dB (無雪時 7.4 dB)、東向き CR では積雪 57cm に対して 11.8dB の後方散乱係数値となり、長岡の無雪状態におけるばらつき (10.6, 11.4, 9.8 dB) と比較しても、ほとんど有意な反射低下が見られなかった。C バンド SAR に比較して浅雪に感度が小さいことも考えられるが、上で述べた通り、CR 周辺だけ選択的に雪が浅くなる効果も十分に考える必要がある。2月23日の記録写真では栃尾田代東向き CR について底面板の露出が確認できる (Fig. 3)。CR が完全に雪に埋まる前、浅雪時の校正・検証のためには、直接 CR の状態をとらえたカメラの情報が非常に重要であると言える。



Fig. 3) 栃尾田代に設置した西向き (左)・東向き CR (右) (2020年2月23日 14:20)。東向き CR の底面にはわずかしき積雪がないことがわかる。

栃尾田代の西向き CR は 2 基分の反射であるにもかかわらず、同一時刻の長岡の西向き CR や同一地点の東向き CR の 1 基の反射より弱くなる結果が得られた。今回の一連の結果から原因を特定することは難しい。一つの可能性として、同一画素内に複数の強い反射体があった場合に反射波の干渉が生じて互いの波を打ち消しあうことが考えられ、この可能性を検討する必要がある。これには CR 間の距離と波長との関係が重要な情報となってくる。

E. 結論

本研究から得られた最も重要な知見は、C バン

ド SAR および L バンド SAR のいずれにおいても、後方散乱係数の減少量が全ての積雪深度に対して同じ関数で変換できるわけではない、ということである。C バンド SAR は浅雪に適しているが、特に積雪深 20 cm 前後で大きな反射特性の変化が見られ、1 m 以上の深さには対応できない可能性が高い。一方の L バンド SAR では更に深い雪に適応させることで、積雪深推定に役立てることができると考えられる。

今回の観測は例年よりも極めて雪の少ないシーズンに実施されたため、豪雪時のデータが欠けている。特に、完全に CR が雪に埋まった状態での様々な積雪深 (1-3 m) に対するレーダー反射特性を解析することが必要となる。同様の実験・解析を継続的に実施し、観測波長を最適に組み合わせたより高精度な手法を開発することで、広範囲の様々な深度に対応した積雪深分布情報の提供につながると思われる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表 (学会名・発表年月・開催地なども記入)

永井裕人, 山口悟, 山下克也, 鹿島真弓
「PALSAR-2 後方散乱強度変化と積雪深との関係」日本地球惑星科学連合大会 2019, 千葉県幕張市 (2019年5月29日) .

永井裕人, 山口悟, 山下克也, 鹿島真弓
「PALSAR-2 を用いた積雪深推定アルゴリズムの作成」(社) 日本リモートセンシング学会 第 66 回 (令和元年度春季) 学術講演会, 埼玉県比企郡鳩山町 (2019年6月4日) .

永井裕人, 山口悟, 山下克也, 本吉弘岐, 林諒, 架谷隆太, 大川翔太郎, 八木拓馬, 河島克久, 佐藤匠, 上石勲, 鹿島真弓「合成開口レーダーを用いた積雪深空間分布の推定 - 初期解析評価と衛星同期観測計画 -」雪氷研究大会 2019, 山形市 (2019年9月11日)

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし